

# Pulverspritzgießen keramischer Mikrobauteile – Entwicklung von Prototypen- und Massenfertigungsverfahren

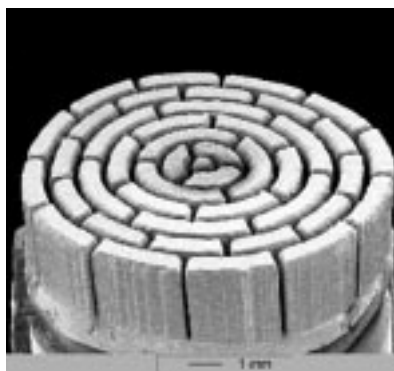
W. Bauer, R. Knitter, V. Plotter, R. Ruprecht, IMF

## Einleitung

Bei der Entwicklung von Mikrosystemen spielt die Nutzung von spezifischen Materialeigenschaften vielfach noch eine untergeordnete Rolle. Die in der Mikrotechnik verfügbare Werkstoffpalette wird daher wesentlich durch den Stand der Entwicklung der Formgebungsverfahren bestimmt. Hierbei werden zumeist Fertigungstechniken eingesetzt, bei denen bereits ein umfangreiches Know-how existiert (z.B. Ätzen von Silizium) oder die eine Anpassung konventioneller Formgebungsverfahren an Mikrodimensionen erlauben (z.B. Spritzgießen von Kunststoffen, galvanische Abscheidung von Metallen). Die Palette der eingesetzten Werkstoffe ist darin stark eingeschränkt. Sie umfasst im wesentlichen Silizium, die Materialklasse Kunststoff sowie einige ausgewählte Metalle.

Durch die Verwendung von keramischen Werkstoffen können sich den Mikrosystemen zahlreiche neue Einsatzmöglichkeiten eröffnen, die mit metallischen oder polymeren Materialien nicht oder nur unzureichend zu realisieren sind. Besonders dann, wenn gute mechanische und tribologische Eigenschaften, chemische und thermische Beständigkeit, geringe thermische Ausdehnung oder spezielle funktionelle Eigenschaften, z. B. piezoelektrisches Verhalten, gefordert werden, bietet sich der Einsatz von Keramiken an oder kann sogar unverzichtbar werden. Keramische Mikrobauteile können als passive Stütz- oder

Trägerelemente unter aggressiven thermischen oder korrosiven Bedingungen eingesetzt werden, bei denen Kunststoffe oder Metalle nach kürzester Zeit versagen würden. In der Mikromechanik ermöglichen sie erhöhte Standzeiten durch die gute Abrasionsbeständigkeit. In der Mikrooptik bieten sie sich aufgrund der niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten an, weil sie z. B. für eine ausreichende Betriebsstabilität optischer Bauelemente bei einem Einsatz im Outdoor-Bereich sorgen. In der Mikroreaktionstechnik eröffnen sie die Möglichkeit, Reaktionen mit aggressiven Medien oder bei sehr hohen Temperaturen durchführen zu können [1]. Weitere aktive Bauelemente, die für die Mikrosystemtechnik von großem Interesse sind, bestehen aus piezokeramischen Materialien, die als Aktoren oder Sensoren wichtige Wandlerfunktionen übernehmen können (Abb. 1).



**Abb. 1: Keramischer Grundkörper für einen Ultraschallwandler aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT-Keramik), realisiert durch Niederdruck-Keramik-Spritzgießen (LP-CIM).**

## Besonderheiten des Spritzgießens von keramischen Mikrobauteilen

Trotz zahlreicher Vorzüge steht einem stärkeren Einsatz von keramischen Werkstoffen eine aufwendige Prozesstechnik entgegen, die besonders bei der Mikrostrukturierung in Kauf genommen werden muss. In den vergangenen Jahren wurden bereits eine Reihe von Strukturierungsverfahren für keramische Mikrobauteile entwickelt [2, 3], die aber hinsichtlich Designfreiheit oder Automatisierbarkeit nur eingeschränkt einsetzbar sind.

Bei der Fertigung komplexer makroskopischer Bauteile hat sich das keramische Spritzgießen (Ceramic Injection Molding, CIM) als Standardverfahren etabliert. Um gegenüber dem Kunststoffspritzgießen durch Pulverspritzgießen Keramikteile zu erhalten, wird eine Formmasse verwendet, die zu mindestens 50 Vol.-% aus Keramikpulver besteht. Durch einen Binderanteil, der das restliche Volumen einnimmt, ist die Formmasse thermoplastisch verarbeitbar. Im Spritzgießvorgang erfolgt die Formgebung zum so genannten Grünling. Danach erfolgt zur Entfernung des Polymeranteils das Entbindern zum Braunling. Abschließend wird der Braunling im Ofen unter Schwindung zum dichten Mikrobauteil gesintert. Der Sinterschrumpf wird durch Maßvorhalt im Werkzeug berücksichtigt.

Es ist daher naheliegend, diese Technik auch zur Herstellung von mikrostrukturierten keramischen

Bauteilen zu verwenden, wozu allerdings eine Reihe von Anpassungen und Erweiterungen hinsichtlich der Formmasseeigenschaften, der Werkzeuggestaltung und der Prozesstechnik erforderlich sind, die den speziellen Anforderungen von Mikrobauteilen Rechnung tragen müssen. Die Besonderheiten des Spritzgießens von Mikrobauteilen wurden zuerst an polymeren Werkstoffen entwickelt [4, 5]. In seinen Grundzügen ist die Abformung einer keramikgefüllten Formmasse, des sogenannten Feedstocks, mit dem Mikrospritzgießen von ungefüllten Kunststoffen vergleichbar [6]. Allerdings werden durch die Pulverbeladung die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Feedstocks spürbar verändert. Aufgrund der erhöhten Wärmeleitfähigkeit des Feedstocks besteht z.B. bei den geringen Querschnitten von Mikrostrukturen leicht die Gefahr einer zu frühen Erstarrung der Formmasse. Für ein vollständig gefülltes Bauteil ist daher eine sehr exakte Temperierung des Werkzeuges erforderlich. Weitere Besonderheiten sind ein:

- Evakuieren des Werkzeuges, um eine vollständige Füllung von sacklochartigen Mikrostrukturen im Werkzeug zu erzielen und um Defekte zu verhindern, die durch Kompression und Erhitzung von Luft verbunden mit der Zerstörung von Kunststoffanteilen vergleichbar der Verbrennung in Dieselmotoren verursacht werden;
- Temperieren des Werkzeuges mit einem Variotherm-Zyklus, das heißt, zu Beginn des Zyklus eine hohe Werkzeugtemperatur einstellen, um entlang

des gesamten Fließweges der Formmasse eine niedrigere Formmasseviskosität und damit eine gute Formfüllung des Werkzeuges zu erhalten, und danach das Werkzeug solange kühlen, dass nach Erstarren der Formmasse eine ausreichende mechanische Festigkeit für eine sichere Entformung gewährleistet ist;

- Öffnen des Werkzeuges und Auswerfen der Mikrobauteile mit sehr niedriger und gleichförmiger Geschwindigkeit, um ein beschädigungsfreies Entformen der Mikrostrukturen sicherzustellen.

Als eine wesentliche Folge sind die Abformzeiten beim Mikrospritzgießen deutlich länger als beim konventionellen Spritzgießen. Da der Zykluszeit eine entscheidende wirtschaftliche Bedeutung zukommt, wurden in den letzten Jahren Anstrengungen unternommen, die zu einer signifikanten Reduzierung der anfänglichen Zeiten geführt haben. Aktuell ist von Zykluszeiten im Minutenbereich auszugehen. Zudem lassen sich durch gleichzeitige Formgebung von mehreren Mikroteilen in einem Zyklus hohe Ausstoßzahlen erzielen.

### Vergleich von Hochdruck- und Niederdruck-Keramik-Spritzgießen

Das Spritzgießen von keramischen Materialien kann in zwei Varianten durchgeführt werden, dem mit einem hohen industriellen Durchdringungsgrad gekennzeichneten Hochdruck- und dem weniger verbreiteten Niederdruck-Keramik-Spritzgießen. Die

grundlegende Gemeinsamkeit beider Verfahren besteht darin, dass ein keramisches Pulver mit einem thermoplastischen Binder vermischt und dadurch in einen fließfähigen Zustand gebracht wird. Die Unterschiede ergeben sich aus der Art der verwendeten Binder, die zu deutlich unterschiedlichen Einspritzdrücken und -temperaturen führen. Die Unterscheidungsmerkmale beschränken sich aber nicht nur auf die Abformbedingungen, sondern erfordern eine unterschiedliche Feedstock-Aufbereitung und voneinander abweichenden apparativen Aufwand. Dies führt letztlich dazu, dass beide Verfahren in unterschiedlichen Anwendungsfeldern zum Einsatz kommen. Während das Hochdruck-Spritzgießen die Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Serienproduktion besitzt, ist das Niederdruck-Spritzgießen prädestiniert für die schnelle Fertigung von Prototypen und Kleinserien [7].

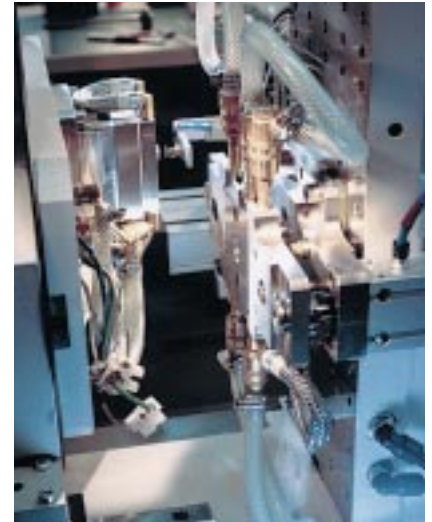
### Hochdruck-Keramik-Spritzgießen (HP-CIM)

Beim Hochdruck-Keramik-Spritzgießen (High Pressure Ceramic Injection Molding, HP-CIM), werden thermoplastische Kunststoffe als Bindermaterialien verwendet (Polyolefine, Polyacetale usw.) [7, 8]. Voraussetzung für die Abformung von Mikrobauteilen ist eine möglichst hohe Festigkeit und Steifigkeit der verwendeten Binder, um Probleme beim Entformen der Teile zu vermeiden. Kommerziell verfügbare Binder, die diese Kriterien am ehesten erfüllen, sind z.B. Hostamont Binder der Clariant GmbH (ehemals

Hoechst AG) oder Catamold Binder der BASF AG.

Maschinenseitig stützt sich das Mikrospritzgießen auf modifizierte Einheiten, die auch in der industriell weit verbreiteten konventionellen Spritzgießtechnik eingesetzt werden. Es stehen somit nicht nur die Spritzgießmaschinen sondern auch Peripheriegeräte und Handhabungseinrichtungen, die lediglich für die spezifischen Belange der Mikrofertigung modifiziert werden müssen, kostengünstig zur Verfügung (Abb. 2).

Um die sehr kleinen Formteilkavitäten befüllen zu können und um den Werkzeugverschleiß möglichst gering zu halten, werden während des Einspritzens relativ hohe Werkzeugtemperaturen eingestellt. Damit kann eine ausreichende Fließfähigkeit der Formmasse ohne die Gefahr von deren Überhitzung gewährleistet und eine Wiederverwendung von Angüssen oder Produktionsabfällen ermöglicht werden [8]. Außerdem liegen die Verarbeitungsfenster der Feedstocks oftmals niedriger als bei ungefüllten Kunststoffen, was die thermische Belastung der mikrostrukturierten Formeinsätze reduziert. So liegt die Formmasse-temperatur hier üblicherweise bei 100 – 200°C, gegenüber z.B. 230°C für PMMA. Die spezifischen Einspritzdrücke liegen beim Mikropulverspritzgießen in Bereichen, wie sie für die gesamte Spritzgießtechnik üblich sind, d.h. zwischen 500 und 1000 bar. Dies kann zu hohen Einspritzgeschwindigkeiten und somit kurzen Zykluszeiten führen, birgt aber die Gefahr der Entstehung von Entmischungen in den Formmassen in sich. Es ist



**Abb. 2:** Anlage für das Hochdruck-Keramik-Spritzgießen (HP-CIM): Spritzgießmaschine Battenfeld Microsystem 50 (links) mit Spritzgießwerkzeug (rechts): Standfläche ca. 2 m<sup>2</sup>, Schließkraft 50 kN.

deshalb besonders auf eine strömungsgerechte Auslegung des Werkzeugs zu achten. Wenn es das Design des Bauteils erlaubt, sollten scharfe Kanten und Ecken im Werkzeug bzw. Formeinsatz durch abgerundete Radien ersetzt werden. Verengungen im Bauteil, sogenannte Fließbremsen, führen zur Entmischung durch Freistrahlbildung und häufig zu vorzeitigem Einfrieren der Masse. Sie sollten daher ebenfalls durch eine Änderung der Bauteilgeometrie umgangen werden. Eine Auswahl typischer Mikrobauteile ist in den Abb. 3, 4 und 5 (links) dargestellt.

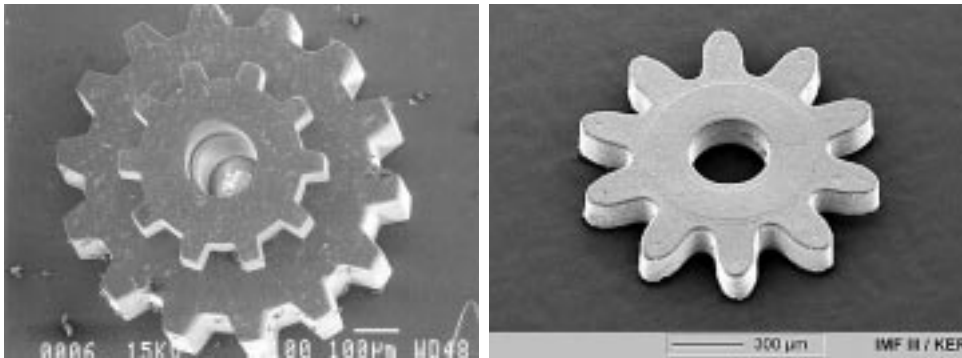
Die aufwendigere Formgestaltung und Temperierung beim Mikrospritzgießen erfordert eine sehr sorgfältige und daher kostenintensive Auslegung des Werkzeuges und des Formeinsatzes. Es ist deshalb sinnvoll, bereits die Planungsphase durch eine Finite-Element Simulation des Einspritz- und Formbildungs-



**Abb. 3:** Prüfkörper mit minimalem Querschnitt von 200 µm x 200 µm für Mikro-Zug- (links) und -Biege-Versuche (rechts), hergestellt durch Hochdruck-Keramik-Spritzgießen (HP-CIM) aus ZrO<sub>2</sub>-Keramik.



**Abb. 4:** Mikro-Zahnrad-Form aus ZrO<sub>2</sub>-Keramik, 500 µm hoch, hergestellt durch Hochdruck-Keramik-Spritzgießen (HP-CIM): der Zahnkopfdurchmesser beträgt 480 µm, die minimale Zahnbreite ca. 70 µm.



**Abb. 5: Spritzgegossene Labormuster von Mikro-Zahnradern: links aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Hochdruck-Keramik-Spritzgießen (HP-CIM)); rechts aus  $\text{ZrO}_2$  (Niederdruck-Keramik-Spritzgießen (LP-CIM)).**

vorganges zu unterstützen, um Fehler möglichst frühzeitig vermeiden zu können. Heutige Softwaretools erlauben zwar eine Simulation der Formfüllung, die qualitativ mit dem Experiment recht gut übereinstimmt. Für eine quantitative Berechnung sind jedoch noch umfangreiche Entwicklungs- und Validierungsarbeiten für geeignete Simulationstools notwendig, um mikro-spezifische Effekte wie Oberflächenspannung zum Werkzeug oder die Pulver-Binder-Wechselwirkung im Feedstock zu berücksichtigen.

### *Niederdruck-Keramik-Spritzgießen (LP-CIM)*

Niederdruck-Keramik-Spritzgießen (Low Pressure Ceramic Injection Molding, LP-CIM), auch Niederdruck-Warmspritzen oder Heißgießen genannt, verwendet zur Plastifizierung der keramischen Pulver keine Thermoplaste, sondern niedrighschmelzende Paraffine und Wachse. Diese schmelzen üblicherweise bei 60 – 70°C und bilden Schmelzen, deren Viskosität nur etwas höher

ist, als die von Wasser. Mit Hilfe geeigneter oberflächenaktiver Substanzen lassen sich so fließfähige Feedstocks mit Feststoffgehalten von über 70 Volumenprozent herstellen. Dies hat zur Konsequenz, dass eine Formgebung in sehr kompakten Anlagen (Abb. 6) bereits bei sehr niedrigen Drücken und Temperaturen durchführbar ist. Übliche Verarbeitungsbedingungen lie-

gen bei 70 – 100°C und bei Einspritzdrücken deutlich unterhalb von 5 MPa. Im Vergleich zum Hochdruck-Spritzgießen lassen sich daraus einige interessante Aspekte ableiten:

- Die Anfertigung des Spritzgießwerkzeugs ist aufgrund der geringeren Anforderungen wesentlich einfacher und kostengünstiger, so dass Niederdruck-Spritzgießen bereits für kleine und mittlere Serien wirtschaftlich sein kann.
- Durch den geringen Einspritzdruck ergibt sich ein verringerter Verschleiß, und es können auch Werkzeuge aus weichen Werkstoffen für größere Serien verwendet werden, z. B. die gut zu mikrostrukturierenden Metalle Messing oder Nickel.
- Geringe Einspritzgeschwindigkeiten reduzieren die Gefahr von Entmischungen in den komplexen Designs und en-



**Abb. 6: Anlagen für das Niederdruck-Keramik-Spritzgießen (LP-CIM): links GOCERAM GC-MPIM-2-MA-X, rechts Peltzman MIGL-33.**

gen Fließwegen von Mikrobauteilen.

Diesen Vorzügen steht aber die geringe mechanische Festigkeit von Paraffin gegenüber. Sie führt speziell bei Mikrobauteilen dazu, dass kompliziert geformte Strukturen, die eine starke Verzahnung mit dem Werkzeug aufweisen, beim Entformen leicht abreißen können. Eine zuverlässige Abformung ist mit dem Verfahren daher üblicherweise nur bei geringer Komplexität der Mikrobauteile möglich.

### Fertigung von Mikrobauteilen durch eine Rapid-Prototyping-Prozesskette

Um das Potenzial des Niederdruck-Keramik-Spritzgießens bei der Herstellung von Prototypen und kleinen Serien besser nutzen zu können, wurde eine Rapid-Prototyping-Methode (schnelle Produktmusterfertigung) entwickelt, mit der sich auch komplex geformte Mikrobauteile schnell und kostengünstig fertigen lassen [1, 9, 10]. Erreicht wird dies, in-

dem die verwendete Spritzgieß-Hohlform nicht aus Metall, sondern aus Silikonkautschuk gefertigt wird. Der weiche Silikonkautschuk ermöglicht eine gute Entformbarkeit auch bei fragilen Details (Abb. 5 (rechts) und 7). Darüber hinaus lassen sich mit Silikonkautschuk Hinterschneidungen entformen, ohne das aufwendige Werkzeugkonstruktionen eingesetzt werden müssen. Mittels Niederdruck-Spritzgießen können Silikonkautschukformen verzerrungsfrei abgeformt werden, wenn der Einspritzdruck hinreichend gering, d.h. kleiner als 0,5 MPa ist. Ein derart niedriger Druck lässt sich mit zahlreichen kommerziell erhältlichen Pulvern erreichen, so dass die Methode für vielfältige keramische Materialien und Bauteile verwendet werden kann. Die Fertigung von umfangreicheren Losgrößen verliert allerdings an Wirtschaftlichkeit, da die Entformung nicht automatisch, sondern manuell erfolgt.

Die Herstellung der Silikonkautschukformen erfolgt durch Abgießen eines Urmodells. Dieses kann aus einem beliebigen Werk-

stoff bestehen, so dass auf leicht zu bearbeitende Materialien zurückgegriffen werden kann. Besonders vorteilhaft ist hierbei eine Rapid-Prototyping-Prozesskette, d.h. die Verwendung von Rapid-Prototyping-Bauteilen als Urmodelle. Diese sind schnell und einfach herzustellen, da sie unmittelbar aus den dreidimensionalen CAD-Daten gefertigt werden. Rapid-Prototyping-Verfahren sind kommerziell in vielfältigen Ausführungen erhältlich, wobei sich vor allem die Stereolithographie durch eine hohe Präzision auszeichnet (Abb. 8). Mit Hilfe der Mikro-Stereolithographie [11] lassen sich sogar Auflösungen im Mikrometerbereich erzielen, so dass auf diese Weise auch filigrane und stark miniaturisierte Bauteile gefertigt werden können. Die durch die Rapid-Prototyping-Prozesskette gefertigten Teile stellen im Gegensatz zu den Rapid-Prototyping-Modellen Funktionsmuster aus dem gleichen Werkstoff und mit den gleichen Eigenschaften wie das spätere Serienprodukt aus Keramik dar.



Abb. 7: Turbinengehäuse aus  $ZrO_2$ -Keramik, hergestellt durch Niederdruck-Keramik-Spritzgießen (LP-CIM).

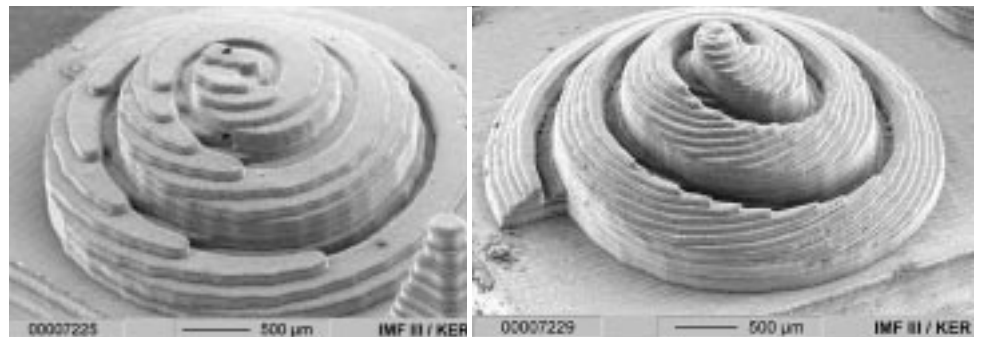


Abb. 8:  $ZrO_2$ -Keramik-Replikat, erzeugt durch Niederdruck-Keramik-Spritzgießen (LP-CIM) aus Stereolithographie-Modellen (Modelle aus kommerziellen Stereolithographie-Anlagen: links Standardauflösung; rechts: hohe Auflösung).

### Eigenschaften von mikrostrukturierten Keramikbauteilen

Im Rahmen der Entwicklungen der CIM-Prozesstechnik wurden zahlreiche geometrische und mechanische Eigenschaften an Labormustern oder Demonstrator-komponenten bestimmt. Die in den nachfolgenden Tabellen 1 – 3 genannten Werte spiegeln den aktuellen Stand der Entwicklung wieder. Sie besitzen meist noch Verbesserungspotenzial, da aufgrund der Vielzahl von Prozessparametern und Bauteilgestaltungen eine umfassende Optimierung sehr zeitaufwendig ist.

### Zusammenfassung

Keramische Pulverspritzgießverfahren kommen in zwei unterschiedlichen Ausprägungen zur Anwendung, als Hochdruck-Keramik-Spritzgießen und als Niederdruck-Keramik-Spritzgießen. Die Verwendung von Thermoplasten mit hoher mechanischer Festigkeit als Binder in den Pulver-gefüllten Formmassen erfordert beim Hochdruck-Spritzgießen hohe Temperaturen und hohe Einspritzdrücke zur vollständigen Formfüllung. Hierzu ist eine belastbare und abrasionsbeständige Werkzeugtechnik erforderlich. Der Prozess bietet

aber die Möglichkeit zur Automatisierung, und ermöglicht somit eine preisgünstige Massenfertigung. Durch niedrugschmelzende Paraffine kann im Niederdruck-Spritzgießen bei deutlich niedrigeren Temperaturen und Drücken gearbeitet werden. Die Werkzeuge, die beim Niederdruck-Spritzgießen eingesetzt werden, lassen sich daher schnell und kostengünstig anfertigen. Die geringe Festigkeit der Paraffine erfordert aber eine manuelle Entformung. Das Verfahren ist aus diesen Gründen prädestiniert für die schnelle Fertigung von Produktmustern und Kleinserien.

Eigenschaft	Stückzahl	Werkzeug	Geometrie-freiheitsgrad	Automatisier-barkeit	Verfügbarkeit
<b>Hochdruck-Keramik-Spritzgießen (HP-PIM)</b>	serien-tauglich	Metall; Investition	2,5 D in Sonderfällen: 3 D	gut erreichbar Anlagentechnik verfügbar	abhängig von Lieferzeit für Werkzeug
<b>Niederdruck-Keramik-Spritzgießen (LP-PIM)</b>	Prototypen	Silikon-kautschuk;  low-cost	2,5 D auch Hinterschnitte möglich	beanspruchungs- arme Hand- entformung	schnelle Werkzeug- fertigung durch Rapid Prototyping

Tab. 1: Vergleich der Stärken der Varianten des Keramik-Spritzgießens bei der Fertigung von keramischen Mikroteilen

Geometrische Eigenschaft	min. Strukturbreite [µm]	min. Strukturdetails [µm]	Aspekt-verhältnis (Höhe/Breite)	max. Rauheit Rt oder Rz [µm]	Mittenrauheit Ra [nm]
<b>HP-PIM</b>	20	> 2	> 10 möglich	> 2	< 400
<b>LP-PIM</b>	30	> 2	> 10 möglich	> 2	< 500

Tab. 2: Vergleich der geometrischen Bauteileigenschaften von Mikroteilen zwischen Hochdruck- (HP-CIM) und Niederdruck-Keramikspritzgießen (LP-CIM)

Werkstoff-eigenschaften	Typische Dichte [th. D.]	Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]	Biegefestigkeit [MPa]	Weibull-Koeffizient
HP-PIM	99 %	0,3 – 0,7	840 – 2100	3,5 – 10
LP-PIM	98 %	0,3 – 0,7	900 – 3000	5,6 – 11,1

Tab. 3: Vergleich von bauteilspezifischen Werkstoffeigenschaften zwischen Hochdruck- (HP-CIM) und Niederdruck-Keramikspritzgießen (LP-CIM), ermittelt an Mikroprobekörpern aus  $\text{ZrO}_2$  (1 mm x 0,2 mm x 0,2 mm).

Beide Pulverspritzgießverfahren wurden in den letzten Jahren am IMF III parallel für die Mikroformgebung weiterentwickelt, um die Materialpalette für die Mikrotechnik um Struktur- und Funktionskeramiken zu erweitern. Sie ergänzen sich in idealer Weise und erlauben eine wirtschaftliche Fertigung von Mikroteilen aus Keramik für Anwendungen z.B. in der Mikrooptik, Medizintechnik oder Mikroverfahrenstechnik vom einzelnen Prototypen bis zur Massenfertigung.

### Danksagung

Die Autoren danken allen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere den Herren G. Bartelt, T. Gietzelt, T. Greiner, L. Merz, K. Plewa und S. Rath für ihre wertvollen Beiträge bei der Durchführung der Arbeiten, T. Fett, IMF II sowie M. Auhorn und T. Beck (iwk1, Universität Karlsruhe) für die Ermittlung und Bereitstellung der Mikrofestigkeitskennwerte. Die Arbeiten wurden dankenswerterweise unterstützt vom

BMBF im Rahmen des HGF-Strategiefondsprojekts MALVE und vor allem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, aktuell im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 499 in Kooperation mit der Universität Karlsruhe.

### Literatur

- [1] R. Knitter, D. Göhring, P. Risthaus, *Keramische Reaktoren für den Einsatz in der Mikroreaktionstechnik. FZKA-Nachrichten, diese Ausgabe.*
- [2] R. Knitter, E. Günther, U. Maciejewski, C. Odemer. *cfi/Ber. DKG 71 (1994) [9], S. 549-556.*
- [3] W. Bauer, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, *Keramische Zeitung 6 (1998) [50], S. 411-415.*
- [4] V. Piotter, T. Hanemann, R. Ruprecht, J. Haußelt, A. Thies, *SPIE Conference Micromachining and Microfabrication, Vol. 3223, Austin TX (1997), pp 91 ff.*
- [5] A. Spennemann, W. Michaeli, A. Rogalla, *Process Analysis of the Injection Molding of Microstructures; Proceedings of Micro System Technologies (1998), VDE-Verlag GmbH, pp. 331-337.*
- [6] G. Baumeister, M. Guttman, A. Haefele, N. Holstein, V. Piotter, R. Ruprecht, G. Schanz, F. Winkler, *Mikrospritzgießen von ungefüllten Kunststoffen. FZKA-Nachrichten, diese Ausgabe.*
- [7] V. Piotter, W. Bauer, T. Benzler, A. Emde, *Microsystem Technologies, 7 (2001), S. 99-102.*
- [8] V. Piotter, T. Gietzelt, K. Mueller, R. Ruprecht, J. Hausselt, *Proceedings of PM 2000 World Congress & Exhibition; Kyoto (2000), pp. 1652-1655.*
- [9] R. Knitter, W. Bauer, D. Göhring, J. Haußelt, *Advanced Engineering Materials, 3 (2001) [1-2], S. 49-54.*
- [10] W. Bauer, R. Knitter, G. Bartelt, P. Risthaus, *in: R. Meyer [Hrsg.] Rapid 2001: Internat. User's Conf. on Rapid Prototyping and Rapid Tooling and Rapid Manufacturing Proc. S.504-509 Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping (2001).*
- [11] R. Götzen, *F&M, 106 (1998), [3], S. 134-136.*